

자동차용 에어컨 호스 조립품의 스웨이징 공정에 대한 유한요소해석 Finite Element Analysis for the Swaging Process of an Automotive Air-conditioning Hose Assembly

백재권 · 김병탁

J. K. Baek and B. T. Kim

(접수일 : 2010년 9월 1일, 수정일 : 2010년 11월 8일, 채택확정 : 2010년 11월 9일)

Key Words : Finite Element Analysis(유한요소해석), Swaging Process(스웨이징 공정), Air-conditioning(A/C) Hose Assembly(에어컨 호스 조립품), Contact Condition(접촉조건)

Abstract : The automotive air conditioning hose is used for connecting the components of air conditioner in a vehicle. The hose is usually manufactured by the swaging process to connect the rubber hose with the metal fitting at the end of the hose. The swaging process leads to various stress and strain configurations in the hose, which give a critical effect on the hose performance. In this paper, the deformation characteristics of an air-conditioning hose during the swaging process were analyzed using the nonlinear finite element method. Especially the rubber layers, which are contacted with the metal fittings, were divided with finer mesh density than the reinforcement braids to increase the solution accuracy. The material properties were obtained from experimental data, and the contact conditions were used in consideration of the real manufacturing process.

1. 서 론

자동차용 에어컨은 압축기, 응축기, 건조기, 증발기 등의 여러 요소로 구성되어 있으며, 에어컨의 각 구성 요소는 에어컨 호스 조립품으로 상호 연결되어 있다¹⁾. 호스 조립품을 각 구성 요소에 연결할 때에는 호스의 양쪽 끝에 파이프 형태의 금속 용구(metal fittings)를 스웨이징^{2),3)}하여 결합한 후 에어컨의 각 부품들과 체결하게 되는데, 스웨이징 공정에서 호스 조립품에 발생하는 응력 및 변형 특성은 호스의 체결력과 이탈력 등 제품의 성능에 큰 영향을 미치게 된다^{4),5)}. 만약 에어컨 호스가 체결력 부족으로 기준 성능을 만족하지 못한다면 가혹한 운전 상태로 인하여 호스와 금속 용구의 연결부에서 냉매가 누출되어 에어컨의 냉각 기능이 저하되는 현상이 발생할 수 있다. 또한 체결력이 너무 크게 제작되는 경우 고무 재료내에 응력과 변형률이 과다하게 발생하여 크랙과 같은 결함이 발생하게 된

다. 실제로 에어컨의 운전조건에 따라 호스내의 하중상태가 변하게 되고, 대기 온도와 차량내부 온도 등에 의한 외부조건도 에어컨 호스의 성능이나 수명에 영향을 미치기 때문에 에어컨 호스의 성능을 사용 이전에 판단하기 위해서는 금속 용구와 고무 호스의 체결부위에 대한 기계적 거동해석이 선행되어야 한다고 볼 수 있다. 그러나 지금까지 고압호스에 대한 해석⁶⁻¹⁰⁾은 단순 호스 형상 대해 특정 이론을 적용하는 방법으로 다수 수행되어 왔기 때문에 호스의 제작과정에 대한 해석은 매우 드문 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 에어컨 호스의 스웨이징 시 내·외면 고무, 편조층, 니플(nipple) 및 슬리브(sleeve)에 발생하는 응력 및 변형 특성을 중심으로 그 거동을 유한요소법으로 해석하였다. 이를 위하여 범용 유한요소 해석 프로그램인 MSC.MARC를 사용하여 에어컨 호스의 실제 체결 방법과 동일한 과정을 접촉 문제로 모델링하였고, 고무 재료의 물성치는 실험치에 근거하여 입력하였으며, 스웨이징 완료 후 각 부위에 발생하는 응력과 변형률을 토대로 그 결과를 검토하였다. 이와 같은 연구를 통하여 얻어진 해석 자료는 추후 실제 호스 제품에서 발생할 수 있는 장애 요인에 대해 합리적인 처리 방안과 개선

김병탁(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : btkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6161
백재권 : 부경대학교 대학원

책을 모색하는데 도움을 줄 것으로 사료된다.

2. 유한요소 해석

2.1 호스형상 및 유한요소모델

Fig. 1은 A/C호스의 단면 형상을 도시한 것으로 내면고무, 중간고무, 외면고무로 구성되어 있으며 호스의 중심으로부터 순서대로 한 개의 나일론 층과 두개의 편조층이 호스의 내·외면 고무층 사이에 위치하여 인장력을 지탱할 수 있는 구조로 되어 있다.

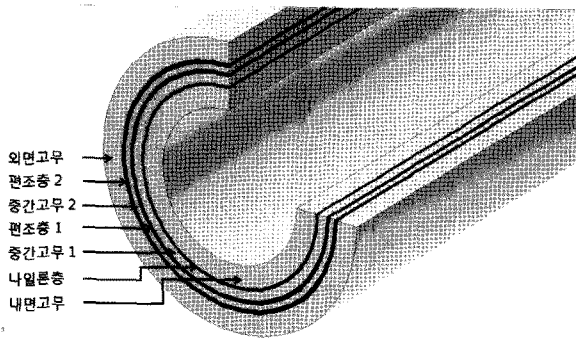


Fig. 1 Geometric shape of the A/C hose

Fig. 2는 본 연구에 사용된 유한요소 모델을 도시한 것으로, 호스가 금속 용구 안으로 삽입되기 전의 해석 초기상태를 나타낸 것이다. 이 모델은 요소의 수 16784개, 절점수 19176개로 구성되어 있으며, 해석 물체의 형상과 하중조건이 호스의 중심축에 대해 대칭을 이루고 있으므로 축대칭 요소를 사용하였다. 또한 실선으로 표시된 것은 스웨이징을 하기 위한 조(jaw)로서 강체로 가정하였으며, 큰 파이프는 슬리브이고, 작은 파이프는 니플로서 접촉력 및 이탈력을 증가시키기 위해 외부에 4개의 홈이 가공되어 있다.



Fig. 2 Finite element model of the hose assembly

Fig. 3은 호스의 유한 요소 모델을 확대하여 도시한 것으로, 삽입과정 해석 시 해의 수렴을 용이하게 하기 위하여 호스와 니플, 슬리브의 요소 크기는

1:1 비율로 구성하였다. 또한 보강층은 해석 중 요소의 지나친 일그러짐(distortion)으로 해가 수렴하지 않는 것을 방지하기 위해 고무층보다 크게 격자를 구성하였다. 모델링 시 호스의 각 층은 각각 별개의 접촉물체로 정의하였으며, 실제와 동일한 상태를 만들어 주기 위해 접촉조건 중 접착(glue) 옵션을 사용하여 해석시 각 층이 서로 분리되지 않는 조건을 사용하였다.

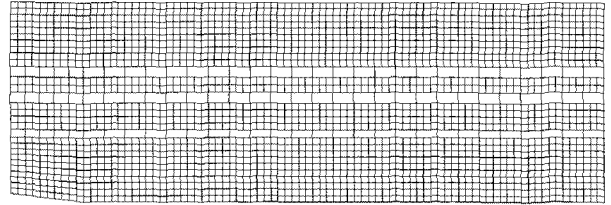


Fig. 3 Grid shape of the A/C hose

2.2 호스 재료의 물성치

Fig. 4는 호스를 구성하고 있는 고무 재료의 인장시험과 압축시험을 통하여 구한 응력-변형률 관계를 나타낸 선도이며, 내면고무는 외면고무보다 상당히 큰 강성을 나타내는 차이점이 있다. 본 연구에서는 각 고무재료의 물성 실험치를 직접 입력하여 해석을 수행하였으며, 중간고무의 물성치는 내면고무와 동일한 값을 사용하였다. 이는 스웨이징 공정 중에 일어나는 과도한 변형에서도 내·외면고무에 비해 상대적으로 두께가 얇은 중간고무가 어느 정도의 강성을 가지고 있어야 하기 때문이다.

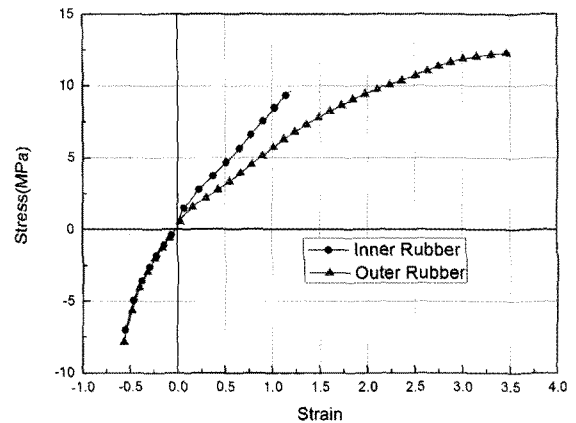


Fig. 4 Stress-strain curve of rubber materials

고무재료의 실험 데이터를 해석 프로그램에 입력하고 일반화된 Mooney-Rivlin 모델에 적용하면 해당 모델의 여러 상수를 결정할 수 있다. 본 해석의

경우적용 가능한 여러가지 모델 중 2차 다항식을 포함하는 모델이 실험 결과와 가장 근접한 곡선을 나타내었으므로, 다음 식과 같은 2차 불변량 모델¹¹⁾ (second order invariant model)을 선택하였다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (1)$$

Table 1은 식 (1)에 의해서 계산된 각 고무재료의 Mooney-Rivlin 상수를 나타낸 것이며, 전술한 바와 같이 중간고무는 내면고무와 동일한 값을 사용하였다.

Table 1 Material constants of rubber materials for the second order invariant model (unit : MPa)

	C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}
Inner rubber	1.87889	-0.885567	0.0167447	0.273423
Middle rubber	1.87889	-0.885567	0.0167447	0.273423
Outer rubber	1.83884	-0.708799	0.126826	-0.0456585

Fig. 5는 대표적으로 외면 고무에 대해 계산된 Mooney-Rivlin 상수로부터 구한 응력-변형을 관계를 실험치와 함께 도시한 것으로, 두 곡선이 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

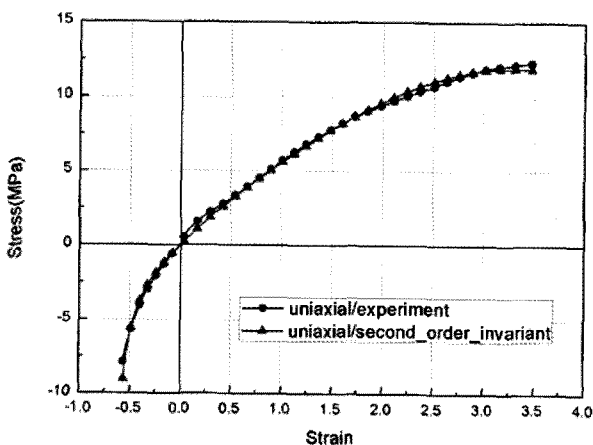


Fig. 5 Comparison of stress-strain curve in second order invariant model with experimental data (outer rubber)

다음으로 호스의 나일론 층과 편조층의 물성치를 추정하기 위해 본 연구에서는 호스 완제품을 사용하여 시험편을 가공하고, 반경방향으로 압축시험을

하였다. 그 결과를 이용하여 계산한 편조층의 종탄성계수는 392 MPa, 나일론 층의 종탄성계수는 400 MPa을 얻을 수 있었다.

2.3 강재의 물성치

호스와 체결되는 강재는 알루미늄 합금으로 니플과 슬리브의 재질이 약간 상이하하며, 그 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties of steel materials

Item	Nipple	Sleeve
Young's modulus (GPa)	68.87	70.27
Poisson's ratio	0.3	0.3
Yield stress (MPa)	144	214

2.4 해석 방법

본 해석은 두 단계로 구성되어 있는데, 첫 번째는 스웨이징 작업 전 호스를 금속 용구 안으로 삽입하는 과정이며, 두 번째는 실제로 스웨이징 작업을 하는 과정이다. 첫 번째 과정이 필요한 이유는 호스의 삽입 시 접촉되는 니플의 외경이 8.5 mm이고, 호스의 내경이 8.2 mm이므로, 억지끼움 상태의 삽입 과정에서 발생하는 변형이 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문이다.

스웨이징 시 조의 움직임은 호스의 체결경을 기준으로 하는데 조가 최대한 안쪽으로 전진한 시점에서 가운데 조와 맞닿은 슬리브의 외경을 체결경이라 한다. 본 연구에서 사용된 모델의 체결경은 ϕ 15.7 mm이고, 실제 작업시의 슬리브 외경 허용 오차는 ± 0.2 mm이었다. 스웨이징 해석시 조의 위치는 가운데 조를 기준으로 슬리브와 0.4 mm 간격만큼 띄어놓은 상태에서 조를 반경방향으로 2.25 mm의 거리를 이동하도록 조건을 부여하였다. 해석시간은 삽입 과정에 1초, 스웨이징 공정에 1초로 총 2초로 하였고, 호스 삽입 후 스웨이징 시에 조의 움직임은 시간에 따른 변위로 설정하여 1.76초까지 조가 반경방향으로 2.25 mm까지 전진한 후 후퇴하도록 하였다. 각 해석과정을 500 간격으로 나누어 진행되었으며, 어떤 시간 간격 내에서 해가 수렴하지 않을 경우에는 자동적으로 그 간격을 10번까지 줄여 수행할 수 있도록 하였다. 해석은 대변형 조건과 updated Lagrangian법¹²⁾을 적용하였으며, 전 모델에 사용한 요소는 모든 구성 방정식에 적용될 수 있는 축대칭 4절점 요소를 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 호스 삽입 후의 접촉 상태

Fig. 6은 호스가 삽입되는 과정을 해석하여 스웨이징 작업 전의 접촉 상태를 도시한 것으로서, 니플의 외경이 호스의 내경보다 0.3 mm 큰 억지끼움 상태이기 때문에 호스가 삽입 되면서 내면고무에 변형이 발생하고, 홈 에서는 내면고무가 니플과 접촉하지 않고, 약간 아래로 처진 상태로 있는 것을 볼 수 있다. 이 초기 접촉 상태는 실제 제품에 호스를 삽입하는 과정 에서도 동일한 현상이 나타날 것이라 예상된다.

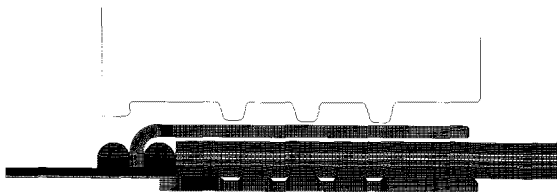


Fig. 6 Inserted geometry of the A/C hose

Fig. 7은 호스가 삽입된 상태에서 내면고무와 니플 접촉면의 응력을 호스 길이 방향으로 도시한 것으로, 스웨이징 작업 전 내면고무에 분포되어 나타나는 응력의 특징은 호스의 삽입 후 내면고무의 변형 형상에서 예상할 수 있듯이 니플의 홈 모서리와 접촉하는 부분에서는 높은 응력이 발생하고 내면고무가 니플과 접촉하지 않는 부분에서는 응력이 급격하게 낮아지는 것을 볼 수 있다.

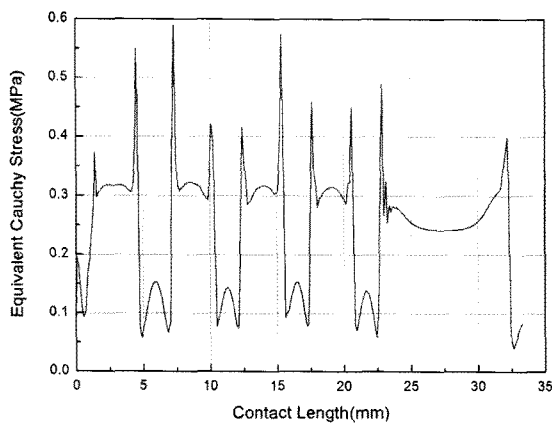


Fig. 7 Initial stress distribution of the inner rubber before swaging process

3.2 금속 용구의 변형 특성

Fig. 8은 조가 슬리브에서 분리되어 제품이 완성

된 후의 호스 조립품의 변형 형상을 도시한 것이다. 조가 반경방향으로 행정거리를 최대로 전진했을 때의 형상도 이와 유사하였으며, 조가 이탈한 후에는 스프링백 현상이 발생하여 일부 변형의 복원되는 것을 관찰할 수 있었다.

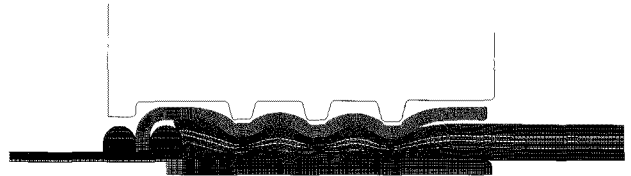


Fig. 8 Deformed shape of the hose components

조와 슬리브의 접촉 중앙부에 해당하는 세 절점의 시간에 따른 변형 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 9에 이들에 대한 반경방향의 변위를 도시 하였다. 절점 7078번은 좌측 조 중앙부와 접촉하는 절점이고, 7140번은 가운데 조의 접촉 중앙부 절점이며, 7202번은 우측조의 해당 접촉점이다. 좌측조의 반경지름이 10.15 mm이고 가운데 조의 반경지름은 10.05 mm, 우측조의 반경지름은 9.95 mm로 각각의 조가 0.1 mm씩 차이가 있으므로, 최대 전진 시점까지 세 절점의 변위는 거의 일정한 차이를 가지고 평행하게 나타남을 알 수 있다. 이후 조가 후퇴 하면서 스프링백 현상이 발생하여 변위는 줄어들게 되는데, 세 절점에서 복원되는 변위는 기하학적 강성의 차이로 조금씩의 차이는 있지만 좌측 조는 0.0358 mm, 가운데 조는 0.0316 mm, 우측 조는 0.0322 mm로 그 값은 비슷하게 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 호스의 응력 분포 특성

Fig. 10은 조가 최대로 전진한 시점에서 호스 전체에 발생하는 응력 분포를 도시한 것으로, 편조층과 나일론 층에서 상대적으로 높은 응력이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 변형이 쉬운 고무층과 달리 섬유재질로 된 편조층과 나일론 층에서 호스의 압축력을 상당 부분 지탱하고 있음을 알 수 있다. 편조층과 나일론 층을 제외한 고무층에서는 확인 결과 최대 조 행정 시점에서는 가장 우측에 있는 니플의 홈 모서리와 접촉하는 부분에서 최대응력이 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 스웨이징 공정에서 호스가 밖으로 밀려나는 것과, 세 개의 조 중에서 우측조가 반경방향으로 가장 큰 압축률을 발생 시킴으로써 나타나는 현상이라 볼 수 있다.

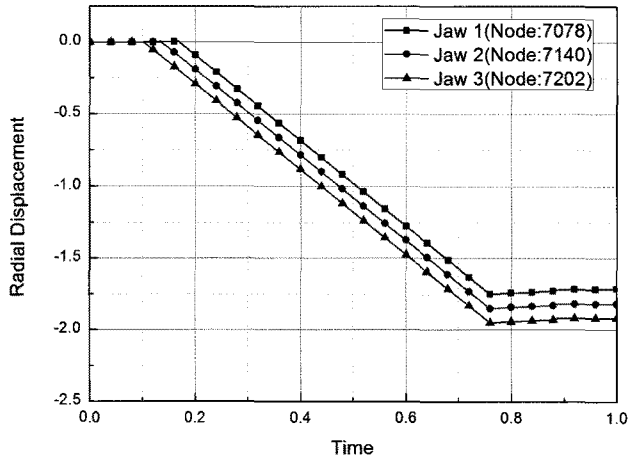


Fig. 9 Radial displacements of three nodes in the center region of the jaws

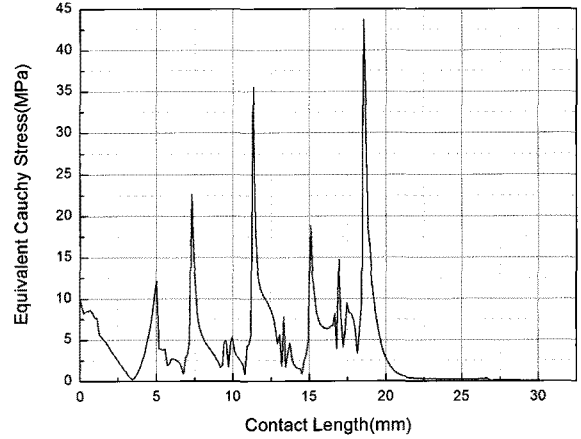


Fig. 11 Cauchy stress variation of the contacted nodes of inner rubber with the nipple at maximum jaw stroke

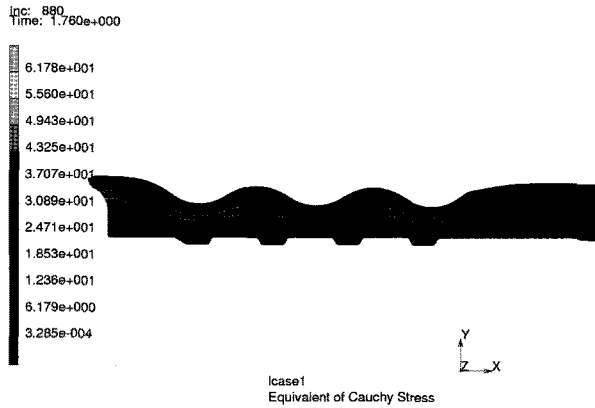


Fig. 10 Cauchy stress distribution of the hose at maximum jaw stroke

Fig. 11은 내면고무와 니플의 접촉면을 따라 응력이 가장 크게 나타나는 절점에 대한 상당 Cauchy 응력을 최대 조 행정 시점에서 길이 방향으로 나타낸 것이다. 여기서 접촉 길이방향의 5 mm에서 20 mm 사이에서 나타나는 피크 응력들은 니플의 홈이 가지고 있는 모서리 부분과 접촉되는 절점에서 나타난 것이며, 그중에서 왼쪽에서 두 번째, 네 번째, 여덟 번째 모서리는 각각의 그 응력 값이 22.6 MPa, 35.6 MPa, 43.7 MPa로 다른 모서리 절점의 피크응력 보다 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 이는 스웨이징 공정 중 슬리브와 니플 사이에 삽입되어 있는 호스가 압축되면서 좌우로 미끄러져 나가려는 경향이 있으나 니플 좌측 부분에서는 그 이동이 제한되므로, 우측 부분으로 밀려나면서 홈의 우측 모서리에서 응력집중 현상이 나타나는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 호스의 스웨이징 작업 완료 후 조가 슬리브와 완전히 분리된 상태에서 내면고무와 니플의 접촉면 응력을 도시한 것이다. 스웨이징 완료 후에는 호스에 외부로부터 가해지는 힘이 제거되고 금속 용구의 영구변형으로 인한 압축만 받고 있기 때문에 조의 최대행정 시점에서 나타나는 응력집중 부위인 두 번째, 네 번째, 여덟 번째 모서리의 응력은 감소함을 알 수 있다. 또한 가장 높은 응력이 발생하는 여덟 번째 모서리는 스웨이징 완료 후 응력이 크게 낮아지면서 여섯 번째 모서리와 일곱 번째 모서리에서는 응력이 다소 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 조의 최대 행정시점에서 여덟 번째 모서리에 집중되는 응력이 스웨이징 완료 후에는 여섯 번째 모서리와 일곱 번째 모서리로 분배되는 것이라 할 수 있다. 네 번째 모서리의 경우, 호스에서 잔류응력

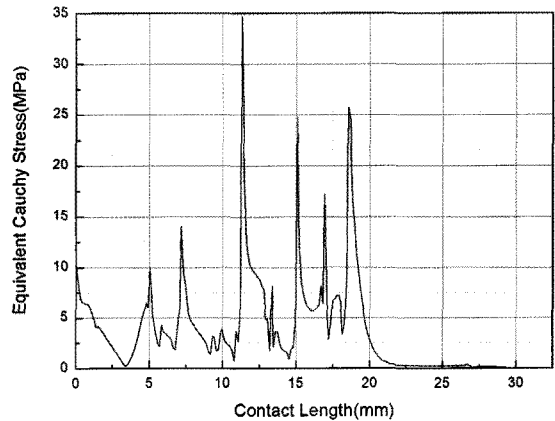


Fig. 12 Stress variation of the contacted nodes of inner rubber with the nipple after release of the jaw

이 가장 큰 부분으로 스웨이징 완료 후 응력 값은 34.6 MPa로 조의 최대 행정 시점과 비슷한 값을 나타내었다. 이는 각각의 조의 위치와 니플의 형상에 따른 스웨이징 완료 후의 응력집중 부위가 네 번째 모서리이고, Fig. 9에 나타난 스프링백 효과가 가장 작은 부분이기 때문이라 파악되며, 호스 제작 시 가장 문제시되는 부분이라 판단할 수 있다.

3.4 호스의 변형률 분포 특성

Fig. 13은 조가 분리된 후 호스에 발생하는 등가 변형률 분포 형상을 나타낸 것이며, Fig. 14는 니플과 접촉하는 내면고무의 해당절점의 변형률 변화를 접촉 길이에 대해 도시한 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 변형률이 상대적으로 높게 발생하는 곳은 응력과 마찬가지로 니플홈의 네 번째, 여덟 번째 모서리 부분이며, 최대 변형률은 약 0.92를 나타내었다. 스웨이징 공정 중 호스의 변형특성으로는 니플의 두 번째 모서리 부분을 중심으로 우측으로는 밖으로 밀려나가고, 좌측으로는 니플의 벽 쪽으로 압축되는 것을 볼 수 있었다.

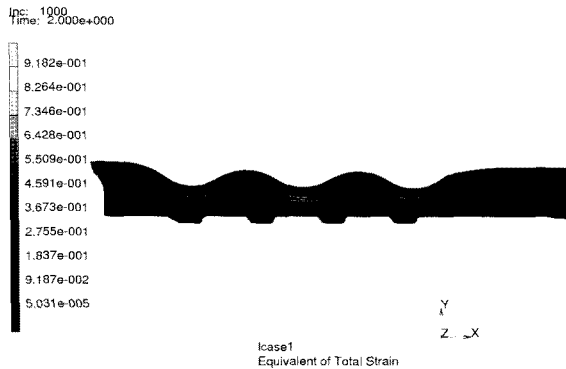


Fig. 13 Total strain distribution of the hose after release of the jaw

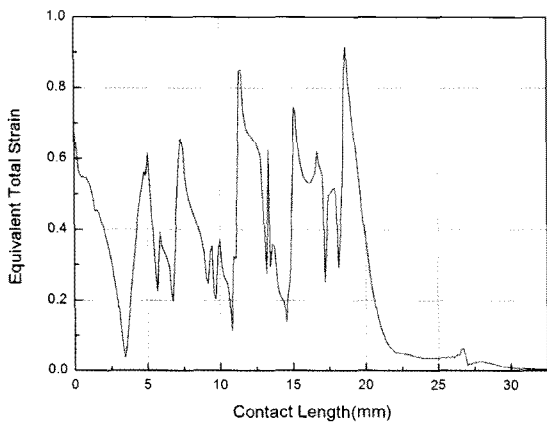


Fig. 14 Strain variations of the contacted node with the nipple after release of the jaw

Fig. 15는 호스가 33 mm 만큼 안쪽으로 완전히 삽입된 이후 스웨이징 공정에 따른 길이방향의 절점 변위를 도시한 것으로, 각 절점은 첫 번째(7619번), 두 번째(7635번), 네 번째(7666번), 여섯 번째(7694번), 여덟 번째(7720번) 모서리와 접촉하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 첫 번째 모서리 부분의 절점은 니플 상의 왼쪽으로 이동하고, 두 번째 모서리 부분은 이동이 거의 없으며, 나머지 절점은 오른쪽으로 밀려나가면서 우측 모서리로 갈수록 그 거리가 더 늘어나는 것을 알 수 있었다.

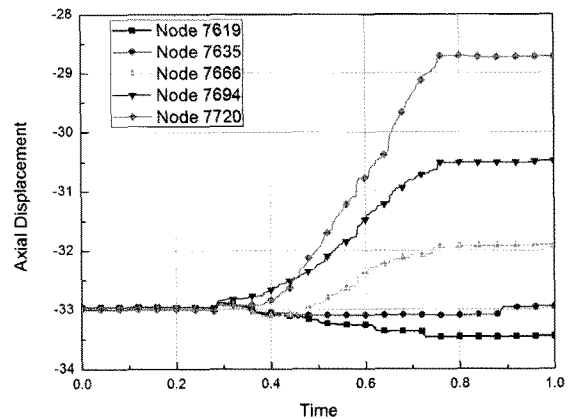


Fig. 15 Axial displacements of contacted five nodes at the corners of the nipple during the swaging process

4. 결 론

본 연구에서는 스웨이징 작업 시 A/C호스에 발생하는 응력 및 변형율을 유한요소법으로 해석하였다. 재료의 물성치는 실험값을 사용하였고, 실제 작업과정과 동일한 접촉조건을 적용하여 시뮬레이션하였다. 해석은 호스 삽입 과정과 스웨이징 공정을 분리하여 동시에 수행하였으며, 그 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 호스 삽입 과정의 억지끼움에서 내면고무에 변형이 발생하고, 니플의 홈으로 인해서 모서리의 접촉부분에 응력 및 변형율이 다소 발생하고 있으므로 스웨이징 공정 해석 시 이 삽입과정에 대한 해석이 반드시 필요할 것으로 사료된다.
- 2) 조가 후퇴하여 발생하는 강제 슬리브의 스프링백에 의한 복원변위는 기하학적 강성의 차이로 약간의 차이는 있지만 그 값은 0.0316 mm ~ 0.0358 mm로 비슷하게 나타냈다.
- 3) 스웨이징 완료 후 니플의 네 번째 모서리 부분의

내면고무 접촉면에서 발생하는 최대응력은 34.6 MPa로 조의 최대 행정시에 비해 응력이 거의 줄어들지 않았으며, 변형율도 상대적으로 높게 나타내었으므로, 실제로 이 부분이 불량 가능성이 가장 높은 걸로 사료된다.

- 4) 금구 안으로 삽입된 호스가 스웨이징 공정에서 조의 위치와 니플의 형상에 따라 일어나는 변형 특성은 니플의 두 번째 모서리 부분을 중심으로 우측의 절점은 오른쪽으로 밀려나가고 좌측의 절점은 니플 상을 왼쪽으로 이동함을 알 수 있었다.

후 기

본 결과물은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. 백재권의 5명, 2010, "상이 격자 밀도를 사용한 자동차용 에어컨 호스의 접촉해석", 한국동력기계공학회, 춘계학술대회논문집, pp.196~202.
2. A. Piela, 1997, "Analysis of the Metal Flow in Swaging-Numerical modelling and Experimental Verification", Int. J. Mech. Sci., Vol.39, No2, pp.221~231.
3. 김형제, 김병탁, 김광희, 윤문철, 2004, "동력 조향장치용 호스와 금속 용구사이의 접촉력에 관한 연구", 한국동력기계공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 140~146.
4. 김형제, 김병탁, 2006, "고압호스 부품의 체결력에 관한 연구", 한국기계공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 335~339.
5. 김형제, 김병탁, 윤문철, 2005, "동력조향장치 호스 조립품의 이탈력 추정에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, Vol.13, No.4, pp. 190~196.
6. SAE Transaction972706, 1997, Hydraulic Hose and Hose Fitting subcommittee, "Wire Braid Angle Response Characteristics in Hydraulic Hose", Vol.22, pp.107~126.
7. W. F. Breig, 1991, "Finite Element Analysis of Spiral Hose Utilizing Laminate Theory", SAE Transaction 911869, Vol.100, pp.968~986.
8. P. C. Bregman, M. Kuipers, H. L. J. Teerling and W. A. van der Veen, 1993, "Strength and stiffness of a Flexible High-Pressure Spiral Hose", Acta Mechanica, Vol.97, No.3, pp.185~204.
9. M. Kuipers, M. van der Veen, 1989, "On Stresses in Reinforced High-Pressure Hoses", Acta Mechanica, Vol.80, No.3, pp.313~322.
10. S. Nair and A. Dollar, 1997, "Stresses and Strains in High-Pressure Composite Hoses", J. of Pressure Vessel Technology, Vol.119, pp.351~355.
11. James, A. G., Green, A. and Simpson, G. M., 1975, "Strain Energy Functions of Rubber I. Characterization of Gum Vulcanizates," Journal of Applied Polymer Science, Vol, 19, pp. 2033~2058.
12. K, J, Bathe, 1982, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, pp.335~341.